

A/O 工艺中溶氧控制策略及其模糊控制器的设计

马 勇¹ 彭永臻² 王淑莹² 白 云³

(1. 哈尔滨工业大学 市政与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 北京工业大学 北京水环境恢复重点实验室, 北京 100022;

3. 沧州市建筑质量监督站, 河北 沧州, 061001)

摘要: 提出用模糊控制的方法控制 A/O(anoxic/oxic)工艺中好氧区 DO, 设计出了结构相对简单、具有良好可靠性与稳定性的恒 DO 和串级 DO 模糊控制器。试验表明可以根据出水氨氮浓度调节 DO 值, 使处理系统在处理水质满足要求的前提下尽可能节省运行费用。

关键词: A/O(anoxic/oxic)工艺; 恒 DO 控制; 串级 DO 控制; 模糊控制器

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2004)S1-0154-04

DO control strategies and its fuzzy controller design in A/O process

MA Yong¹, PENG Yong-zhen², WANG Shu-ying², BAI Yun³

(1. Faculty of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Key Laboratory of Beijing Water Environment Recovery, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

3. Construction Quality Supervisory Station of Cangzhou City, Cangzhou 061001, China)

Abstract: The method of fuzzy control is proposed to use DO control in aerobic zones in A/O (anoxic/oxic) process, and two on-line fuzzy controllers, the constant DO and cascade DO control each was designed, with simple structure, high reliability and stability, and it offers good idea for controlling non-linear, time-varying, ill-defined and fuzzy complex systems. Experiments show that the cascade DO control strategy, which will adjust the DO set point according to the effluent ammonia concentration, can effectively control DO concentration in aeration tanks, optimize process performance and minimize energy consumption.

Key words: anoxic/oxic process; constant DO control; cascade DO control; fuzzy controller

生物脱氮需要经历硝化和反硝化反应 2 个过程, 硝化过程需要严格的好氧条件, 反硝化过程则需要严格的缺氧环境, 溶氧(DO)的大小将直接影响处理工艺中硝化菌和缺氧菌的含量和比例, 从而影响总氮的去除效率。混合液中 DO 较低时, 硝化反应过程将受到明显抑制, 曝气池中丝状菌会大量繁殖, 导致污泥膨胀; DO 较高时, 除了增加能耗外, 强烈的空气搅拌会使污泥絮体打碎而影响出水水质; 硝化液回流带入大量 DO 会对缺氧区反硝化产生影响, 当缺氧区 DO 含量过高时, 氧将与硝酸盐竞争电子供体, 抑制硝酸盐还原酶的合成及其活性, 氧化亚氮还原酶受抑制时, 可使 N₂O/N₂ 的比例增高, 并使 N₂O 作为反硝化的最终产物而积累, 故一般认为曝气池 DO 控制在 2 mg/L 较为适宜。由于城市污水

厂曝气能耗约占污水厂所有运行费用的 50%, 对城市污水厂运行费用的些许节省就能带来很大效益^[1], 但生物脱氮过程受多种因素影响, 是一个典型的具有非线性、时变性、随机性和模糊性的复杂系统, 目前我国大部分城市污水厂没有采用合理的曝气控制, 即使采用也只是传统的 PID 控制, 效果很不理想, 造成能量的浪费。试验证明模糊控制理论正是解决这类复杂系统的有力工具, 模糊控制已经在污水处理领域得到成功的应用^[2]。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

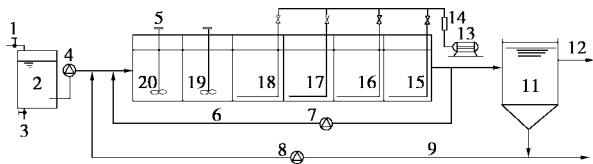
试验所用反应器为聚氯乙烯塑料制作, 装置如图 1 所示, 反应器分为 6 个格室, 其中前 2 个格室缺

收稿日期: 2003-12-19

基金项目: “863”资助项目(2003AA601010)、北京市教委重点项目(KZ200310005003)及北京市重点实验室开发基金

作者简介: 马勇(1976-), 男, 博士生; 彭永臻(1949-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事污水处理及其智能控制的研究, 通讯联系人, 0451-2291734。

氧运行,后 4 个格室好氧运行,反应器体积为 48 L,二沉池采用竖流式,体积为 20 L。试验的进水、回流污泥和硝化液回流流量采用蠕动泵控制,进水流量为 144 L/d,温度由自动控温仪控制在 $(21 \pm 1) ^\circ\text{C}$,试验过程中污水在缺氧池和好氧池的水力停留时间(HRT)分别为 2.6 h 和 5.5 h,污泥停留时间(SRT)为 12~15 d,活性污泥浓度(MLSS)为 $(2.5 \pm 0.1) \text{ g/L}$,进水碱度为 360 mg/L,污泥回流比为 0.8,内循环回流比为 2.5。



1—进水管;2—水箱;3—放空管;4—进水蠕动泵;5—搅拌器;
6—硝化液回流;7,8—蠕动泵;9—污泥回流;10—剩余污泥;
11—二沉池;12—出水;13—空压机;14—流量计;
15、16、17、18—好氧区;19、20—缺氧区

图 1 A/O 工艺试验模型图

1.2 试验用水与测试方法

试验采用模拟生活污水为考察对象,通过控制不同的淀粉投量达到不同的 COD 值,投加 NaHCO_3 控制进水 pH 值为 6.5~8。人工合成的模拟废水包含(g/L):淀粉(0.2~0.6),氯化铵(0.1~0.30), KH_2PO_4 (0.02~0.033), NaHCO_3 (0.05~0.15), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.09), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.03), $\text{FeSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.003)。

试验中测定 COD、 $\text{NH}_4^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^- \text{-P}$ 、pH 值、总碱度、DO、氧化还原电位(ORP)、MLSS 等采用国家规定的标准方法,水样值经过滤后测定。DO 测定采用 WTW-300i 溶解氧在线仪,pH 值和 ORP 均采用 HANNA 在线测定仪。

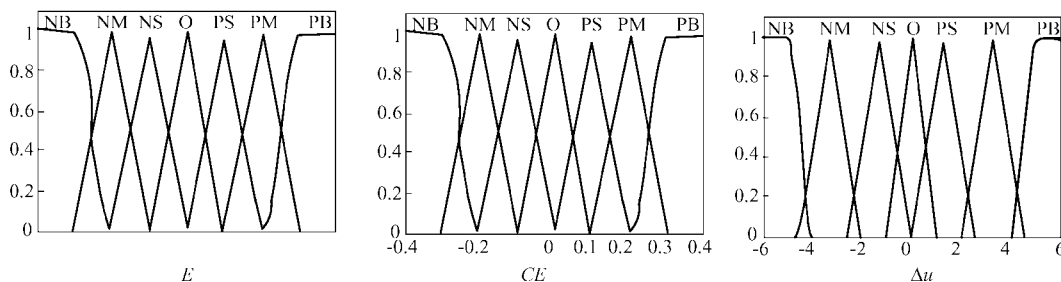


图 2 恒 DO 模糊控制器输入变量 E 、 E_C 以及输出变量 Δu 的隶属函数

2.2.3 控制规则的建立

模糊控制规则很容易用计算机语言的条件语句来描述,建立 DO 在线模糊控制规则表的基本原则

2 传统 DO 控制策略及其模糊控制器设计

2.1 恒 DO 控制策略

目前城市污水厂 DO 控制主要采取恒定曝气量和恒 DO 控制策略,恒 DO 控制是通过调节曝气量的大小维持好氧区 DO 浓度不变,一般维持在 2 mg/L 。由于污水厂进水负荷的变动大,采用恒定曝气量控制会出现好氧区前端负荷过高造成曝气量不足,形成厌氧环境;而后端由于曝气过量,造成能量浪费。采用恒 DO 控制可以解决上述问题,然而传统的 PID 控制手段进行恒 DO 控制,控制效果不理想,试验证明以最优出水水质和节能为目标的智能控制系统是解决当前污水处理厂问题的关键。笔者根据试验结果建立了恒 DO 模糊控制器。

2.2 恒 DO 模糊控制器的设计

2.2.1 模糊控制变量的确定

模糊控制器输入变量越多,控制精度越高,但实现也越困难,所以采用了应用最广的二维控制器。以在线测定的 DO 值与给定 DO 设定值的偏差 E 和该偏差的变化量 E_C 这两者的综合信息作为模糊控制器的输入变量,输出变量取供气量的增量 Δu 。

2.2.2 模糊控制器输入变量的模糊化

由模糊控制原理可知,模糊控制器的输入和输出变量都是确定量,而模糊控制算法本身要求模糊变量。这就需要首先将精确的输入变量经模糊化处理变为模糊变量。根据运行经验和试验数据,确定的输入变量和输出变量的基本论域、模糊语言值及隶属函数如图 2。由于模糊控制器的控制规则表现为一组模糊条件语句,输入、输出变量均定义为 7 个词汇:NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、O(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。这样既方便规则的制定,又保证控制性能。本研究中选择描述简单、计算方面的三角形函数。

是:在适当考虑偏差变化模糊变量大小的前提下,当偏差大或较大时,以尽快消除偏差为主来选择控制变化量;而当偏差较小时,注意防止超调和以被控制

系统的稳定性为主来选择控制变化量。根据上述原则和实际经验编制出的控制规则如表 1 所示。

表 1 恒 DO 在线模糊控制规则

| DO 误差 (E) | DO 误差的变化 E_c | | | | | | |
|------------------|----------------|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NM | NS | O | PS | PM | PB |
| NB | PB | PB | PB | PB | PM | PS | O |
| NM | PB | PB | PB | PM | PS | O | NS |
| NS | PB | PM | PM | PS | O | NS | NM |
| O | PM | PM | PS | O | NS | NM | NM |
| PS | PM | PS | O | NS | NM | NM | NB |
| PM | PS | O | NS | NM | NB | NB | NB |
| PB | O | NS | NM | NB | NB | NB | NB |

2.2.4 模糊控制器输出变量的非模糊化

由表 1 可见,模糊控制器根据其控制规则输出的是一个模糊量,这个模糊量不能直接控制被控系统,还必须经过非模糊化处理将其转换成确定量。本文采用加权平均法作为非模糊化处理方法,计算公式为 $Z_{\Delta\mu} = \sum_{i=1}^{49} \mu_u(z_i) \cdot z_i / \sum_{i=1}^{49} \mu_u(z_i)$,这种方法可以充分利用模糊推理结果、模糊子集提供的有用信息量,得到 DO 在线模糊控制表,储存在计算机中,可有效地提高计算速度。经过论域反变换可得曝气量的精确控制量: $\Delta U = K_u Z_{\Delta\mu}$,式中 K_u 为比例因子,表示将控制变化 $Z_{\Delta\mu}$ 量从论域 $[-6, +6]$ 转换为有确定值的控制变量。

2.3 恒 DO 模糊控制器的运行

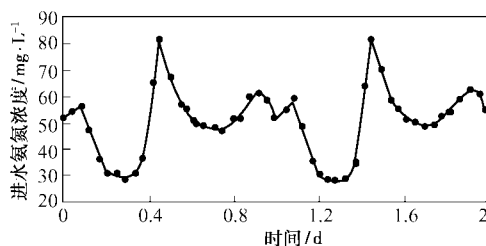


图 3 进水氨氮浓度

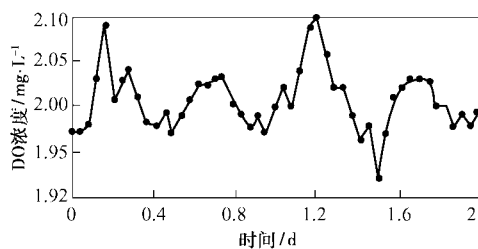


图 4 恒 DO 模糊控制好氧区 DO 浓度

为了验证恒 DO 模糊控制器,进行了硬件设计并用于 A/O 工艺的实际控制过程中,试验装置如图 1,DO 设定值取 2 mg/L,试验进水氨氮浓度如图 3,进水 COD 维持在 400 mg/L 左右。图 4 为模糊控制

好氧区 DO 浓度,由图可知模糊器可以迅速克服进水氨氮浓度的变化,通过变化曝气量的大小,能精确控制 DO 处于设定值。图 5 为恒 DO 模糊控制时出水氨氮浓度,由图可得出水氨氮浓度变化很大,其中一段时间内出水氨氮浓度远远大于 5 mg/L,达到 10 mg/L,而另外大部分时间内出水氨氮浓度远远小于 5 mg/L,几乎为 0。所以恒 DO 控制并不能保证出水氨氮浓度稳定和节约能耗的目的,当出水氨氮浓度高时,应提高好氧区 DO 浓度,降低出水氨氮浓度;而当出水氨氮浓度低时,应降低好氧区 DO 浓度,节约能耗。

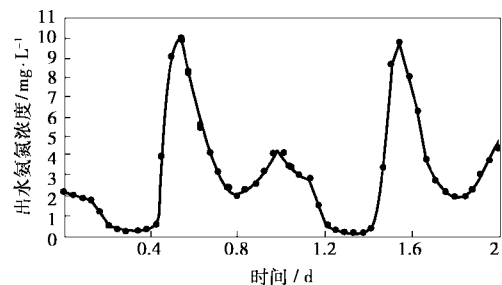


图 5 恒 DO 模糊控制时出水氨氮浓度

3 串级 DO 控制策略及其模糊控制器设计

3.1 串级 DO 控制策略

恒 DO 模糊控制器基本上弥补活性污泥工艺具有非线性、模糊性及不确定性所存在的缺陷,但国家环保局发布的城镇污水处理厂污染物排放新标准(GB18918—2002)中规定氨氮一、二级排放标准(5 mg/L)远高于旧标准要求(15 mg/L),而且由于城市污水厂进水氨氮的变化很大,显然采用恒 DO 控制不能满足出水氨氮的排放标准。

为了满足新标准氨氮排放要求,应采取更加有效的控制策略,试验证明采用串级 DO 控制策略可以有效解决上述问题^[4]。串级 DO 控制策略包括主、副 2 个控制器,主控制器以出水氨氮浓度来确定 DO 浓度,即设定值的大小,当出水氨氮浓度小于 5 mg/L 时,降低 DO 设定值,出水氨氮浓度越低,DO 设定值越小,为了维持好氧区污泥的混合状态,规定一个最低值,实验中定为 0.5 mg/L;当出水氨氮浓度大于 5 mg/L 时,升高 DO 设定值,出水氨氮浓度越高,DO 设定值越大,当然 DO 设定值不能无限增大,实验中最大值定为 5 mg/L。副控制器以主控制器获得 DO 设定值来控制曝气量的大小。

3.2 串级 DO 模糊控制设计

串级 DO 模糊控制器的副控制器采用本文第 2 节建立的恒 DO 模糊控制器,只是改变了 DO 设定

值。串级 DO 控制策略中主控制模糊器建立步骤同第 2 部分,包括模糊控制器输入变量的确定、模糊化、控制规则的建立以及模糊控制器输出变量的非模糊化。图 6 是输入变量(出水氨氮浓度设定值与出水氨氮浓度测定值之间的偏差 E_{NH} 及其偏差的变化值 $E_{C,NH}$)、输出变量(DO 设定值的变化量 Δu_{DO})的基本论域、模糊语言值及隶属函数,表 2 是串级

DO 控制主控制器模糊控制规则。

表 2 串级 DO 在线模糊控制规则

| 误差变化 | 误差 | | | | | | |
|------|----|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NM | NS | O | PS | PM | PB |
| N | PB | PB | PM | PM | PS | O | PM |
| Z | PB | PM | PS | O | PS | NM | NB |
| P | PS | O | O | NM | NB | NB | NB |

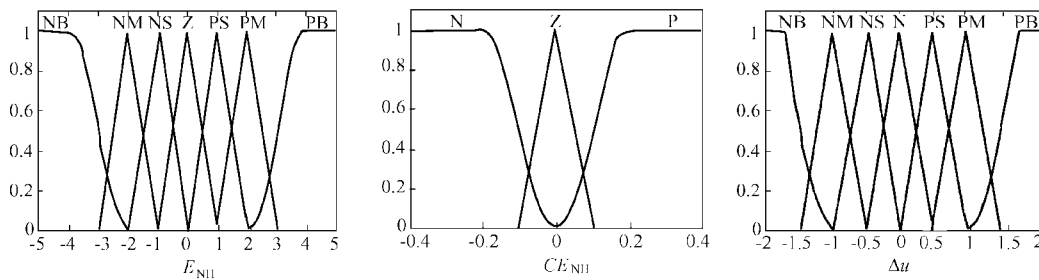


图 6 串级 DO 模糊器输入变量 E_{NH} 、 $E_{C,NH}$ 以及输出变量 Δu_{DO} 的隶属函数

3.3 串级 DO 模糊器运行

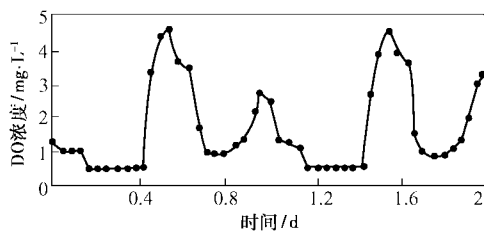


图 7 串级 DO 模糊控制好氧区 DO 浓度

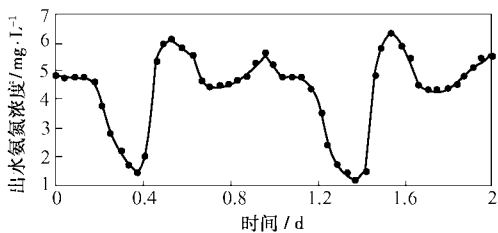


图 8 串级 DO 模糊控制时出水氨氮浓度

为了验证串级 DO 模糊器的正确性,进行了硬件设计并用于 A/O 工艺的实际运行控制过程中,试验装置如图 1,试验进水氨氮浓度如图 3,进水 COD 维持在 400 mg/L 左右。图 7 为串级 DO 模糊控制好氧区 DO 浓度,图 8 为串级 DO 模糊控制出水氨氮浓度。从图中可得应用串级控制策略后,DO 设定值可随出水氨氮浓度改变,当出水氨氮浓度超过排放标准 5 mg/L 时,模糊控制器提高好氧区 DO 浓度,因而硝化速率得到提高,相应降低了出水氨氮浓度,如图 7 DO 浓度最大增加到 4.6 mg/L,而出水氨氮浓度由恒 DO 控制时的最大 10 mg/L 降低到 6.2 mg/L,降低了 38%,不管进水氨氮浓度从 30 mg/L 变化为 80

mg/L,出水氨氮浓度基本上满足排放标准;当出水氨氮浓度满足排放标准且较低时,控制器降低 DO 浓度,以节约曝气能耗,如图好氧区 DO 浓度很长一段时间内降低到最低值 0.5 mg/L,计算表明节约能耗大约 30%。由于恒 DO 控制不能根据出水氨氮浓度调整 DO,导致出水氨氮浓度较低甚至为 0,大大浪费了运行能耗,因此串级 DO 控制策略相对于恒 DO 控制具有更大的优势,不仅可以满足新标准对氨氮浓度的排放要求,而且可大大节约运行能耗,因而具有重要的实际意义,是提高当前城市污水厂 DO 在线控制的一个重要策略。

4 结语

DO 大小将直接影响系统总氮和氨氮的去除率,而污水厂普遍采用的恒 DO 控制,并不能满足出水氨氮浓度的排放标准。试验证明串级 DO 控制是提高当前城市污水厂 DO 控制的最优策略,它可以根据出水氨氮的大小来调节 DO 值,以使处理系统在处理水质满足要求的前提下尽可能节省运行费用。

参考文献

[1] Ferrer J, Rodrigo M A, Seco A. [J]. Water Science and Technology, 1998,38(3): 209 - 217.
 [2] Kalker T J J, van Goor C P, Roeleveld P J. [J]. Water Science and Technology, 1999,39(4): 71 - 78.
 [3] 李士勇,等. 模糊控制和智能控制理论与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
 [4] Singman J. Efficient control of wastewater treatment plant - a benchmark study[D]. Uppsala: Uppsala University. 1999. ■